

PENGARUH POSISI PENYEBARAN FEMTOCELL PADA IMPLEMENTASI LTE FEMTO YANG TERINTEGRASI DENGAN JARINGAN GSM

IMPACT OF DEPLOYMENT POSITION ON THE IMPLEMENTATION OF LTE FEMTO INTEGRATED WITH GSM NETWORK

Muhammad Yaser¹, Rina Pudji Astuti², Arfianto Fahmi³

¹Fakultas Teknik Elektro Universitas Pancasila

^{2,3}Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹muhammadvaser@univpancasila.ac.id, ²rinapudjiastuti@telkomuniversity.ac.id,

³arfiantof@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Pada studi ini diobservasi tentang posisi penyebaran *femtocell* yang mempengaruhi koeksistensi LTE femto dengan jaringan GSM. Seperti yang kita ketahui bahwa jaringan koeksistensi sangat tergantung pada kondisi sebaran *femtocell*, diantaranya posisi penyebaran *femtocell*. Pada studi sebelumnya telah dibahas mengenai jaringan koeksistensi dimana LTE femto diintegrasikan dengan GSM *macrocell*. LTE femto sendiri beroperasi pada GSM *band* dengan skema alokasi frekuensi tertentu untuk memfasilitasi transisi menuju LTE. Namun studi sebelumnya belum membahas tentang pengaruh posisi penyebaran *femtocell*. Kinerja kedua sistem yang dalam hal ini SINR dan *femtocell throughput* dianalisis secara matematis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa posisi penyebaran *femtocell* memiliki efek pada kinerja jaringan koeksistensi. SINR GSM menurun ketika jarak *femtocell* makin menjauh dari GSM BS, sedangkan SINR *femtocell* dan *femtocell throughput* makin meningkat pada kondisi ini. Maka posisi penyebaran *femtocell* sangat mempengaruhi sistem koeksistensi LTE *femtocell* dengan jaringan GSM

Keywords — GSM Macro ; LTE femto ; posisi penyebaran.

Abstract

In this study was observed about deployment position has an affect on the implementation LTE femto integrated with GSM network. As we know that the coexistence network strongly depends on deployment condition, such as, deployment position. About the coexistence network, it has been discussed in the earlier study, the LTE femto is deployed at GSM *macrocell*. The LTE femto itself operates in GSM band under certain frequency allocation scheme as a means of facilitating smooth transition toward LTE. Yet, it does not offer suggestion about the deployment position as affect. Both systems performance are analyzed mathematically in terms of SINR and *femtocell throughput*. Simulation is to be employed in supporting analysis which the result presents that deployment position has an effects to the performance of the coexistence system. SINR of GSM decrease as the farther distance *femtocell* toward GSM BS. Despite, it also increases SINR LTE femto and *femtocell throughput*. For that reason, the implementation of LTE femto integrated with GSM network can be influenced by deployment position.

Keywords—GSM Macro; LTE femto; Deployment position.

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan aplikasi multimedia cenderung meningkat dengan pesat setiap waktu, Sedangkan alokasi spektrum dan jumlah pelanggan yang dapat dilayani semakin terbatas. Operator harus menemukan cara untuk meningkatkan kapasitas sistem dengan sumber daya

frekuensi yang terbatas, salah satu solusinya adalah membagi sumber daya yang ada, misalnya dengan *cell splitting* [1]. Hal ini mengacu pada realokasi frekuensi GSM band ke frekuensi teknologi yang lebih efisien dan optimal, misalnya, *Long Term Evolution (LTE)*. Dengan demikian, *GSM refarming* adalah suatu kebutuhan yang mendesak. Namun memerlukan waktu karena tidak mudah bagi operator seluler untuk segera menghentikan layanan GSM [2].

Koeksistensi LTE femtocell dengan jaringan GSM yang ada diusulkan untuk mengatasi tantangan meningkatnya permintaan data dengan tetap mempertahankan layanan GSM. Seperti pada studi [3], *LTE femtocell* diintegrasikan pada jaringan GSM. Pada sistem Koeksistensi, *LTE femtocell* beroperasi pada GSM band pada skema alokasi frekuensi tertentu sebagai sarana memfasilitasi transisi menuju LTE pada frekuensi GSM band. Selain itu, telah diinvestigasi bagaimana menghentikan destruktif interferensi *femtocell* ke jaringan *macrocell* ketika *femtocell* menggunakan alokasi frekuensi yang sama dengan sistem makro [4,5]. Pada penyebaran LTE femto ke jaringan GSM, salah satu pertanyaan yang perlu diinvestigasi adalah bagaimana pengaruh posisi penyebaran *femtocell* terhadap kinerja GSM makro dan LTE femto. Dalam studi [3] belum ada solusi dengan jelas sehingga pada studi ini diobservasi mengenai hal tersebut. Kemudian kelayakan jaringan koeksistensi terkait dengan posisi penyebaran *femtocell* perlu dievaluasi.

Paper ini disusun dalam beberapa bagian. Pada bagian II, diperkenalkan model dan formulasi sistem. Bagian III memberikan rincian metrik kinerja yang digunakan dalam penelitian. Evaluasi dan hasilnya disajikan pada bagian IV, bagian ini juga memberikan pembahasan tentang hasilnya. Kesimpulan dan rencana kerja kedepan diuraikan dalam bagian V.

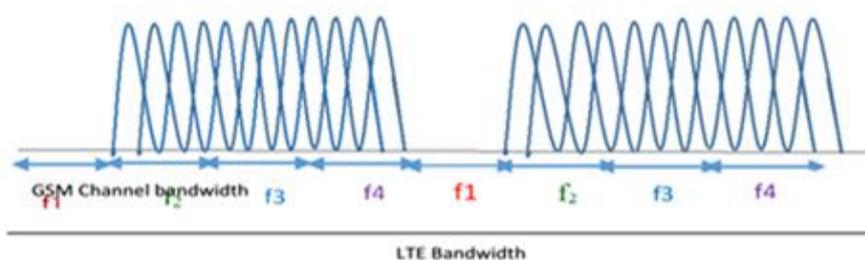
2. MODEL SISTEM & FORMULASI

2.1 Model koeksistensi

Jaringan koeksistensi harus dapat diterima baik oleh sistem GSM dan LTE. Dalam arti bahwa penyebaran *LTE femtocell* tidak boleh menurunkan kinerja jaringan GSM, sementara itu harus tetap memberikan layanan yang tepat dalam *LTE femtocell* yang baru digunakan [6]

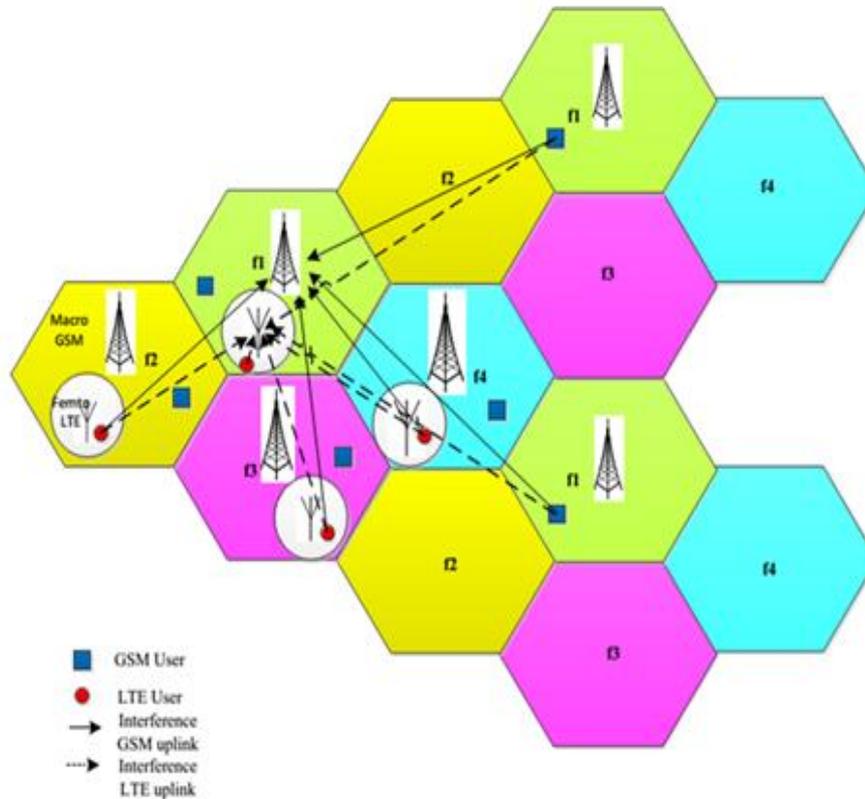
Dalam jaringan koeksistensi, *LTE femtocell* beroperasi dengan teknologi *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)* sehingga dapat memanfaatkan beberapa fraksi frekuensi radio tanpa mengganggu bagian lain dari frekuensi yang terletak di antaranya. Dalam studi alokasi frekuensi antara GSM dan *LTE femtocell*, skema yang diusulkan dalam [3] diadopsi dimana *LTE femtocell* dapat memanfaatkan semua saluran kecuali yang digunakan oleh *GSM macrocell* di mana *femtocell* berada.

Misalnya sel GSM menggunakan reuse cluster f_1 . *LTE femtocell* yang terletak di sel GSM ini tidak menggunakan f_1 untuk mencegah interferensi pada GSM BS. Masing-masing dari *femtocell* akan menggunakan cluster tetap f_2 f_3 f_4 dengan cara OFDM seperti yang digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema alokasi kanal *LTE femtocell* pada GSM cell yang menggunakan reuse cluster f_1 [3]

Dalam skema alokasi frekuensi ini, setiap *femtocell* LTE beroperasi di semua saluran GSM kecuali yang digunakan oleh *macrocell* GSM. Interferensi *uplink* yang diterima oleh GSM BS dan LTE *femtocell* diilustrasikan Gambar 2.



Gambar 2 Model interferensi *uplink*

Pada Gambar 2, GSM BS *macrocell* di f_1 mengalami inter-cell interference, GSM BS menerima Interferensi dari GSM MS yang terhubung ke sel yang menggunakan f_1 (GSM cell $\in \Psi(f_1)$) dan di interferensi oleh LTE *femtocell* yang terletak di GSM cells $\notin \Psi(f_1)$. Sementara itu untuk LTE *femtocell* di f_1 , dapat menerima interferensi dari GSM MS yang terhubung ke $\in \Psi(f_1)$, *femtocell* di GSM cell lainnya $\notin \Psi(f_1)$ dan *femtocell* di sel yang sama.

2.2 Model Jaringan GSM.

GSM beroperasi di berbagai pita frekuensi, dalam studi ini digunakan 1.8GHz. Sebagai teknologi yang didasarkan pada *Time Division Multiple Access* (TDMA), GSM menggunakan *frekuensi reuse* untuk memanfaatkan sumber daya frekuensi. Frekuensi yang dialokasikan untuk operator dapat dibagi menjadi kelompok-kelompok K dan dibagi oleh masing-masing *cluster reuse*. K adalah *reuse factor*. Pada studi ini fokus pada GSM *Uplink*. Model sel heksagonal, yang memiliki *Omni-directional base station* di pusat dengan jari-jari sel R. *mobile station* (MS) bergerak secara acak dalam sistem.

Jika $P^g(r)$ adalah daya transmisi GSM MS yang berjarak r dari *Base Station* (BS) dan $P^s(R)$ adalah daya transmisi maksimum pada GSM MS. Maka Q^s kekuatan sinyal yang diterima di BS adalah :

$$Q^g = P^g(r) L(r) = P^g(R) L(R) \quad (1)$$

$L(d)$ adalah *propagation loss* untuk jarak d dan $L(R)$ sebagai *propagation loss* maksimum, dari persamaan (1), maka diperoleh [3]:

$$P^g(r) = \frac{L(R)}{L(r)} P^g(R) \quad (2)$$

Untuk model propagation, COST231 Hatta dengan pusat frekuensi 1.8GHz, tinggi antena BS sekitar 30m, dan tinggi MS sekitar 1.5m, $L(d)$ pada skala dB adalah sebagai berikut [3]:

$$L(d) = 136.2 + 35.2 \log_{10}(d \text{ [km]}) \quad (3)$$

2.3 Model indoor LTE femtocell

LTE *Femtocell* diasumsikan digunakan dalam ruangan, dan formulasi Motley-Keenan digunakan untuk model propagasi dalam ruangan. Pada pemodelan ini di asumsikan bahwa *femtocell* di mana BS dan MS terletak di lantai yang sama. *Propagation loss* pada 1.8GHz dirumuskan sebagai berikut [3].

$$L(d) = 37.5 + 20 \log_{10}(d \text{ [m]}) \quad (4)$$

Jarak antara MS dan BS di *femtocell* diasumsikan 20 m. *Wall penetration loss* 5dB digunakan untuk propagasi antara entitas dalam dan luar ruangan. Dalam *Time Division Duplex (TDD)*, BS dan MS *femtocell* menggunakan pita frekuensi yang sama. Jika P^l adalah daya transmisi BS *femtocell*, MS juga dianggap memiliki daya transmisi yang sama. Hal ini karena *bandwidth* LTE tersebar di sejumlah kanal GSM. Pada pemodelan ini didefinisikan daya transmisi efektif LTE *femtocell* yang merupakan bagian dari daya transmisi yang mempengaruhi saluran frekuensi GSM sebagai $P^{l\text{eff}}$. Daya sinyal yang diterima sesuai dengan $P^{l\text{eff}}$ dinyatakan dengan $Q^{l\text{eff}}$ [3]

BS dan MS *femtocell* diasumsikan tidak dibedakan oleh sistem GSM dan karena itu pemisahan antara femto BS dan MS dapat diabaikan dibandingkan dengan ukuran GSM cell. Akibatnya, LTE *femtocell* sebagai entitas tunggal dalam perhitungan interferensi

3. METRIK KINERJA

3.1 SINR GSM BS dan LTE Femtocell uplink

Pada studi ini diinvestigasi pengaruh LTE *femtocell* terhadap kinerja sistem GSM. Pada Gambar 2, jika $\Psi(f_l)$ menunjukkan GSM sel yang menggunakan *reuse cluster* f_l . Dalam jaringan koeksistensi ini, pada GSM radio dalam sel $\Psi(f_l)$, interferensi berasal dari dua sumber yaitu GSM MS lainnya yang terhubung ke sel $\in \Psi(f_l)$ dan LTE *femtocell* yang terletak di dalam GSM sel $\notin \Psi(f_l)$.

Jika Q^g adalah daya sinyal yang diterima BS, I_j^{gg} adalah nilai harapan interferensi dari GSM MS dalam sel $\in \Psi(f_l)$ terhadap GSM BS, maka [3].

$$I_j^{gg} = \int_0^R \int_0^{2\pi} P^g(r) L(\sqrt{r_j^2 + D_{js}^2 - 2r_j D_{js} \cos\theta_j}) \frac{r}{\pi R^2} d\theta_j dr_j \quad (5)$$

$I_k^{lg}(x)$ adalah besar nilai harapan interferensi dari LTE *femtocell* pada GSM sel $\notin \Psi(f_l)$ terhadap BS seperti di bawah ini [3];

$$I_k^{lg}(x) = \int_0^{2\pi} P_{eff}^l L(\sqrt{x^2 + D_{ks}^2 - 2xD_{ks} \cos\beta_k}) \frac{1}{2\pi} d\beta_k \quad (6)$$

Background noise pada GSM BS adalah N_b^g dan sama dengan $N_0 W^g N_F^g$. Dimana N_0 adalah *noise spectral density*, W^g adalah bandwidth GSM dan N_F^g nilai *noise* pada BS.

Jika $\gamma^g(x, M)$ adalah nilai SINR yang diharapkan pada GSM BS dengan adanya M femtocell pada tiap GSM cell dengan jarak x dari GSM BS terdekat, maka [3]:

$$\gamma^g(x, M) = \frac{Q^g}{\sum_{j \in \Psi(f_1)} I_j^{gg} + M \sum_{k \notin \Psi(f_1)} I_k^{lg}(x) + N_b^g} \quad (7)$$

Sementara itu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, Untuk SINR LTE femtocell terletak pada cell $\in \Psi(f_1)$, intereferensi LTE femtocell berasal dari GSM MS yang menggunakan f_1 , femtocell pada GSM sel yang lain $\notin \Psi(f_1)$, serta femtocell pada sel yang sama.

Jika $Q^{l\text{eff}}$ adalah daya efektif yang diterima pada kanal GSM, $I_j^{gl}(x)$ adalah nilai harapan intereferensi dari sebuah GSM MS yang menggunakan f_1 sebagai mana berikut [3],

$$I_j^{gl}(x) = \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} P^g(r_j) L \sqrt{(r_j \cos \theta_j - D_{js} - x \cos \beta_s)^2 + (r_j \sin \theta_j - x \cos \beta_s)^2} \frac{r_j}{2\pi^2 R^2} d\beta_s d\theta_j dr_j \quad (8)$$

$I_k^{ll}(x)$ adalah intereferensi dari femtocell pada GSM sel yang lain $\notin \Psi(f_1)$ seperti di bawah ini [3],

$$I_k^{ll}(x) = \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} P_{eff}^l L \sqrt{(x \cos \beta_k - D_{js} - x \cos \beta_s)^2 + (x \sin \beta_k - x \sin \beta_s)^2} \frac{1}{4\pi^2} d\beta_s d\beta_k \quad (9)$$

Nilai intereferensi dari femtocell yang lain pada GSM cell yang sama adalah $I_s^{ll}(x)$ [3];

$$I_s^{ll}(x) = \int_0^{2\pi} P_{eff}^l (\sqrt{2x^2 (1 - \cos \beta_s)}) \frac{1}{2\pi} d\beta_s \quad (10)$$

Akhirnya *background noise* pada femto BS dan MS adalah $N_b^l = N_0 W^g N_F^l$. dimana N_F^l adalah besar *noise* pada LTE BS dan MS

Sedangkan $\gamma^l(x, M)$, nilai harapan SINR femtocell dalam M dan x sebagai mana berikut [3];

$$\gamma^l(x, M) = \frac{Q_{eff}^l}{\sum_{j \in \Psi(f_2)} I_j^{gl} + M \sum_{k \notin \Psi(f_2)} I_k^{ll}(x) + (M-1) I_s^{ll}(x) + N_b^l} \quad (11)$$

3.2 Femtocell throughput

Guna mengukur kapasitas throughput pada kanal ditiap LTE femtocell dihitung menggunakan persamaan Shannon sebagai mana berikut [7];

$$C = B \log_2 (1 + \gamma^l(x, M)) \quad (12)$$

Di mana B adalah bandwidth kanal dari LTE femtocell, $\gamma^l(x, M)$ adalah SINR dari sistem LTE femtocell.

4. SIMULASIDAN HASIL

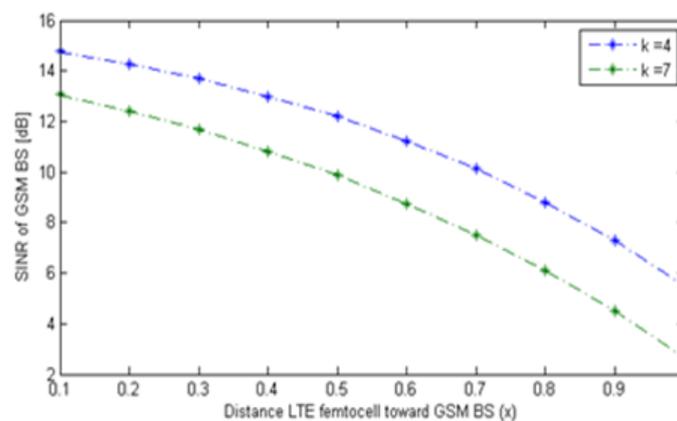
Pengaruh posisi penyebaran *femtocell* terhadap kinerja jaringan GSM dan LTE femto di observasi dengan eksperimen numerik. Parameter yang digunakan dalam studi ini disajikan pada tabel.1

Tabel 1. Parameter eksperimen

Parameter	Nilai
K	4,7
macrocell radius [km]	0.6 km[26]
Jumlah <i>femtocell</i>	6
Posisi <i>femtocell</i>	(0.1R, 0.2R,...R)
$P^g (R)$	30 dB
P^l_{eff}	6 dB
N_o	-174 dB
W^g	200 kHz
N^g_F	5 dB
N^i_F	5 dB

4.1 Pengaruh posisi penyebaran femtocell terhadap SINR GSM

Posisi penyebaran femtocell terhadap GSM BS mempengaruhi interferensi dari *femtocell* ke GSM BS. Pengaruh perubahan posisi sebaran femtocell terhadap SINR GSM sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.



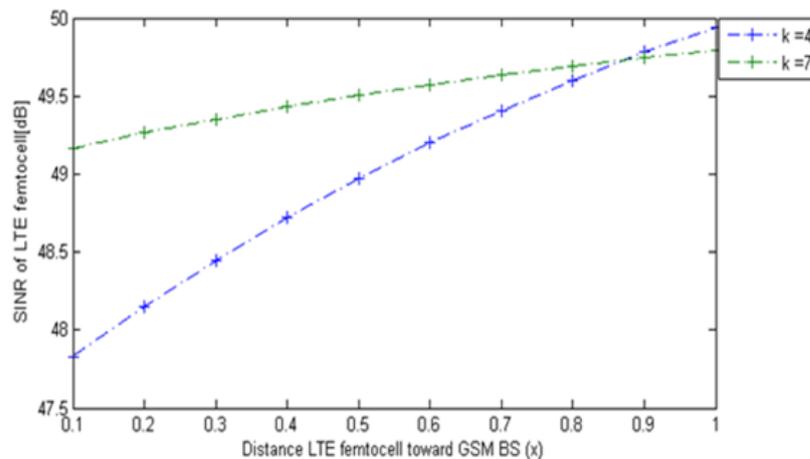
Gambar 3. SINR GSM vs Posisi *femtocell*

Pada Gambar 3, SINR GSM menurun karena jarak *femtocell* yang makin jauh terhadap GSM BS. Ketika jarak *femtocell* ke GSM BS berubah dari $x = 0,1R$ ke $x = R$, terjadi penurunan SINR

GSM sekitar 9dB untuk $K = 4$ dan 10dB untuk $K = 7$. Jarak *femtocell* terhadap GSM BS yang semakin jauh membuat interferensi dari *femtocell* meningkat karena penurunan *pathloss* dari *femtocell* penginterferensi, sehingga SINR GSM BS berkurang. Selain itu, diantara dua *reused factor* pada studi ini, *reused factor* 4 memberikan SINR GSM tertinggi ketika semua parameter konstan. Ketika *femtocell* disebar di dekat pusat GSM *macrocell* yaitu $x = 0,1R$, SINR pada GSM BS mencapai 15dB untuk $K = 4$ dan 13 dB untuk $K = 7$. Kemudian SINR menurun karena jarak *femtocell* yang makin jauh terhadap GSM BS. Kecenderungan bahwa *reused factor* yang lebih kecil memiliki SINR tinggi dapat disebabkan oleh penurunan interferensi dari *femtocell* lainnya pada *reused factor* yang lebih kecil. Penurunan interferensi ini karena pada *reused factor* kecil, jumlah *femtocell* penginterferensi semakin sedikit.

4.2. Pengaruh posisi penyebaran femtocell terhadap SINR LTE femtocell

Posisi penyebaran antara LTE *femtocell* dan GSM BS mempengaruhi interferensi antar-*femtocell* sehingga perubahan posisi *femtocell* berpengaruh pada SINR LTE *femtocell*. Simulasi untuk mendapatkan hubungan antara posisi penyebaran *femtocell* dengan SINR LTE *femtocell* dilakukan dengan dua *reused factor* sebagaimana pada gambar 4

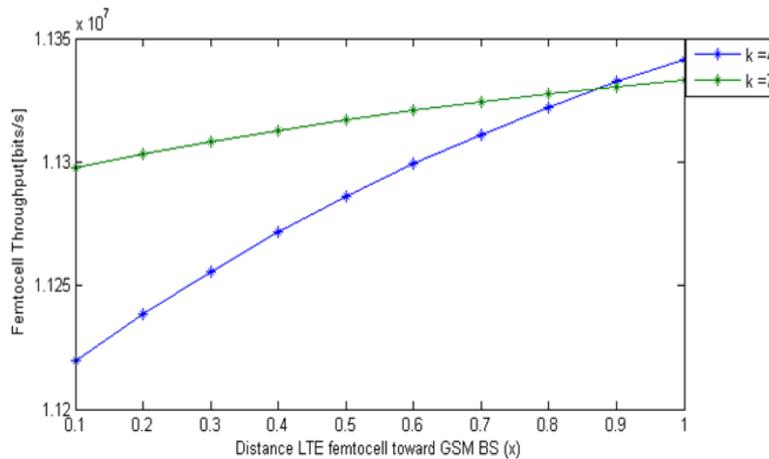


Gambar 4. SINR LTE femtocell vs Posisi femtocell

Gambar 4 menunjukkan bahwa SINR LTE femtocell meningkat ketika semakin jauh jarak femtocell terhadap GSM BS. Dari grafik terlihat bahwa pengaruh dari posisi penyebaran *femtocell* cukup signifikan. Ketika posisi *femtocell* berubah dari $x = 0,1R$ ke $x = R$, SINR LTE *femtocell* meningkat sekitar 2,2dB untuk $K = 4$ dan peningkatan 0,6dB untuk $K = 7$. Meningkatnya SINR LTE *femtocell* disebabkan oleh makin kecilnya interferensi antar-*femtocell* karena jarak yang makin jauh. Semakin jauh akan meningkatkan *path loss* dari *femtocell* penginterferensi dan mengurangi kekuatan interferensi dari *femtocell*, sehingga meningkatkan SINR LTE *femtocell*. Sementara itu, untuk dua *reuse factor* ketika posisi *femtocell* lebih dekat ke pusat GSM sel dan mengakomodasi kurang dari 6 *femtocell* per GSM sel, didapat SINR LTE *femtocell* untuk $K = 7$ lebih tinggi dari $K = 4$. Ini terjadi karena sebelum mengakomodasi lebih banyak LTE *femtocell* pada setiap GSM cells, kanal dengan *reuse factor* yang lebih besar menerima lebih sedikit interferensi dari GSM MS dalam sel *co-channel*. Seiring meningkatnya jumlah *femtocell* dan semakin jauh jaraknya ke GSM BS, memungkinkan *reuse factor* 4 menghasilkan SINR LTE *femtocell* lebih tinggi. Hal ini dapat dilihat dalam skenario ketika posisi *femtocell* $x = 0,9R$ dan menampung 7 *femtocell* lebih setiap GSM sel. Ini terjadi karena dalam skenario ini interferensi antar femtocell untuk *reuse factor* $K = 4$ kurang dari *reuse factor* $K = 7$.

4.3. Pengaruh posisi penyebaran femtocell terhadap throughput femtocell

Posisi penyebaran antara LTE *femtocell* dan GSM BS memberikan pengaruh terhadap interferensi antar *femtocell* sehingga perubahan posisi *femtocell* akan berpengaruh pada throughput *femtocell*. Simulasi diaplikasikan dalam berbagai kondisi, misalnya dua *reuse factor* sebagaimana ditunjukkan gambar 5.



Gambar.5 Posisi penyebaran femtocell vs throughput femtocell

Pada Gambar 5, grafik menunjukkan bahwa throughput LTE *femtocell* meningkat seiring semakin jauh jarak *femtocell* terhadap GSM BS (x). Ketika posisi penempatan berubah dari $x = 0,1R$ ke $x = R$, throughput LTE *femtocell* meningkat sekitar $1,2 \times 10^2$ kbits / s untuk $K = 4$ dan 40 kbits / s peningkatan untuk $K = 7$. Peningkatan throughput *femtocell* disebabkan oleh berkurangnya interferensi antar *femtocell* karena letak yang makin jauh. Semakin jauh jarak cenderung meningkatkan *propagation loss* dari *femtocell* lain dan mengurangi kekuatan interferensi antar *femtocell*, sehingga meningkatkan throughput dan SINR *femtocell*. Sementara itu, untuk dua *reuse factor* ketika posisi *femtocell* lebih dekat ke pusat GSM cell dan menampung kurang dari 6 *femtocell* per GSM cell, diperoleh *femtocell throughput* untuk $K = 7$ lebih tinggi daripada $K = 4$. Hal ini karena ketika belum mengakomodasi lebih banyak LTE *femtocell* pada setiap GSM sel, jaringan dengan *reuse factor* yang lebih besar menerima lebih sedikit interferensi dari GSM MS dalam sel *co-channel*. Oleh karena itu, *throughput femtocell* cenderung lebih tinggi. Seiring meningkatnya jumlah *femtocell* dan semakin jauh jarak terhadap GSM BS, memungkinkan *reuse factor* 4 memberikan *throughput femtocell* yang lebih tinggi. Hal ini dapat dilihat ketika posisi *femtocell* $x = 0,9R$ dan mengakomodasi 7 *femtocell* lebih. Ini terjadi karena dalam skenario ini interferensi antar *femtocell* untuk *reuse factor* $K = 4$ kurang dari $K = 7$. Dengan demikian, *throughput femtocell* meningkat.

5. KESIMPULAN

Sehubungan dengan posisi penyebaran *femtocell*, SINR GSM menurun karena jarak *femtocell* yang makin jauh terhadap GSM BS. Dalam studi ini ketika jarak *femtocell* terhadap GSM BS berubah dari $x = 0,1R$ ke $x = R$ menyebabkan penurunan SINR GSM sebesar 9dB untuk $K = 4$ dan 10dB untuk $K = 7$, hal ini disebabkan oleh peningkatan intereferensi dari *femtocell*. Oleh karena itu, disarankan untuk menempatkan *femtocell* mendekati pusat GSM cell untuk melindungi kinerja GSM. Sebaliknya SINR LTE *femtocell* meningkat seiring semakin jauh jarak *femtocell* terhadap GSM BS. Terlihat ketika posisi penempatan berubah dari $x = 0,1R$ ke $x = R$, SINR LTE *femtocell* meningkat sebesar 2,2dB untuk $K = 4$ dan meningkat sebesar

0,6dB untuk $K = 7$. Peningkatan SINR LTE *femtocell* disebabkan oleh interferensi antar *femtocell* yang berkurang karena jarak lebih jauh. Semakin jauh jarak cenderung meningkatkan *propagation loss femtocell* penginterferensi dan mengurangi kekuatan interferensi dari *femtocell*. Untuk *throughput femtocell*, ketika posisi penempatan berubah dari $x = 0,1R$ ke $x = R$, peningkatan *throughput femtocell* sekitar $1,2 \times 10^2$ kbits / s untuk $K = 4$ dan peningkatan 40 kbits / s untuk $K = 7$. Peningkatan *throughput femtocell* disebabkan oleh interferensi antar *femtocell* yang berkurang karena jarak yang semakin jauh. Oleh karena itu, disarankan untuk penyebaran *femtocell* lebih jauh dari GSM BS untuk mendapatkan peningkatan SINR *femtocell* dan *throughput femtocell*.

Akhir kata, implementasi LTE *femtocell* yang terintegrasi dengan jaringan GSM sangat tergantung pada kondisi penyebaran *femtocell*. Selanjutnya, berbagai skenario kondisi penyebaran diperlukan untuk studi lebih lanjut. Selain itu, skema manajemen interferensi lanjutan untuk jaringan koeksistensi juga merupakan hal yang menarik untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Jain Sonal, Hussain Muzzammil. 2017. Improving Capacity in Wireless Heterogeneous Networks by Mitigation of Interference. Cochin, India. 7th International Conference on Advances in Computing & Communications, ICACC-2017.
- [2] Lin Xingqin, Viswanathan Harish. 2013. Dynamic spectrum refarming of GSM spectrum for LTE small cells. IEEE Globecom Workshops.
- [3] K W Sung, Lei Shi, J Zander. 2010. Coexistence of LTE Femtocell with GSM Cellular Network. Personal Indoor and mobile radio communication (PIRMC), IEEE 21st International symposium.
- [4] Reza A, Raisa F, Abdullah, K. 2016. Inter cell interference mitigation technique in femtocell and macrocell in LTE system. 2016 IEEE student conference on research and development (SCORED).
- [5] Jafarpour-Alamdari S, Solouk V, Kalbkhani H and Shayesteh M.G. 2012. Interference analysis of femto-macrocell networks in 6-sector macrocell layout. 6th International Symposium on Telecommunications (IST).
- [6] Penttinen Jyrki T.J. 2016. The LTE – Advanced deployment handbook.
- [7] Mudau N, Shongwe T, Babu S. 2016. Analysis of femtocell for better reliability and high throughput. IASTED Conference.